

全国电子类技工学校试用教材

电子计算机原理

TP33
L 38

192398

全国电子类技工学校试用教材

电子计算机原理

天津电子仪器厂 李玉芬 主编
技工学校

天津科学技术出版社

全国电子类技工学校试用教材

电子计算机原理

天津电子仪器厂 李玉芬 主编
技工学校

*

天津科学技术出版社出版

天津市赤峰道124号

天津新华印刷一厂印刷

天津市新华书店发行

*

开本 787×1092毫米 1/16 印张 26 字数 634,000

一九八三年一月第一版

一九八三年一月第一次印刷

印数: 1—11,000

统一书号: 15212·73 定价: 2.10元

本书以100系列130机为典型，较为系统地全面地介绍了电子数字计算机的工作原理及生产、调试过程。全书除绪论外共分十一章。绪论介绍了电子数字计算机的发展、应用、结构组成及工作过程；第一、二、三章分别介绍了数码运算、逻辑代数及计算机中的基本逻辑部件；第四章介绍了计算机的指令、指令类型、指令格式及寻址方式，并介绍了130机指令系统；第五章介绍了运算器结构、运算方法及实现过程；第六、七章分别介绍了组合逻辑控制器和微程序控制器；第八章介绍了磁心存储器的存取方法、读写过程及半导体存储器和MOS存储器的的工作原理；第九章简单介绍了中断与通道；第十章介绍了光电、穿孔、控打、宽行机及磁盘存储器；第十一章介绍了计算机的生产与调试。

本书是为电子类技校计算机硬件专业编写的教材，也可供中专、技校其他有关专业的学生和具有初中以上水平的技术工人以及电子计算机爱好者自学参考。

本书由天津电子仪器厂技工学校李玉芬、李延睦、马广成和天津电子计算机厂何衡光共同编写，由李玉芬主编。绪论及第一、二、三、四、七、九章由李玉芬编写，第五、六章由李延睦编写，第八、十章由马广成编写；第十一章由何衡光编写。

主审由天津市第二机械工业局于清汶和天津无线电技术研究所曲庭维担任。参加审稿的还有天津无线电技术研究所的葛天鹏、张楷、张同波、刘连禄、李凤翔等。

前 言

为了适应技工学校电子类专业的教学需要,不断提高技工学校的培训质量,加速实现我国的四个现代化,国家劳动总局、第四机械工业部委托北京、天津、上海三市和四川、广东两省的劳动局、电子工业主管部门,组织编写了技工学校电子类三个专业(无线电技术、半导体器件、电子计算机)的部分技术基础课和专业课十二种教材。计有:电工基础、电子电路基础、电子测量与仪器、无线电接收设备、电视机原理调试与维修、无线电整机装配工艺基础、半导体器件制造工艺、半导体工艺化学、晶体管原理、制图与钳工知识、半导体集成电路、电子计算机原理。

这套教材对于二年制(招收高中毕业生)和三年制(招收初中毕业生)的技工学校均适用。这些专业的普通课教材没有另行编写,建议采用国家劳动总局和第一机械工业部委托上海市劳动局、上海市第一机电工业局一九七九年组织编写的全国技工学校机械类通用教材中的普通课教材。我们在组织这套教材的编写时,注意到了这两套教材在内容上的衔接。

根据技工学校的培养目标和教学计划的要求,这套教材在强调加强生产实习教学的同时,注意了加强基本理论知识和对新技术、新工艺的吸收。由于技工学校在教学范围内还有许多问题需要探讨,加之这套教材还没有通过教学实践的检验,故先作为试用教材出版发行。

因为时间仓促,编写经验不足,这套教材难免存在一些问题,恳切希望广大读者批评指正,以便作进一步修改。

国家劳动总局培训司

第四机械工业部教育局

一九八一年十二月

目 录

绪论	(1)
第一章 运算基础.....	(6)
§1-1 计算机中的数制	(6)
§1-2 不同数制间的转换	(10)
§1-3 二进制数的定点浮点表示法	(17)
§1-4 机器中用的码制	(20)
§1-5 常用的其他编码	(28)
复习题	(32)
第二章 逻辑代数.....	(34)
§2-1 逻辑代数简介	(34)
§2-2 逻辑代数的基本规律	(36)
§2-3 逻辑函数与逻辑电路	(40)
§2-4 逻辑函数的化简——代数化简法	(44)
§2-5 逻辑函数的化简——图形化简法	(48)
§2-6 逻辑函数的化简——适用型化简法	(53)
§2-7 关于函数化简的进一步讨论	(56)
复习题	(63)
第三章 逻辑部件	(67)
§3-1 简单部件	(67)
§3-2 译码器和编码器	(77)
§3-3 触发器	(83)
§3-4 寄存器	(87)
§3-5 计数器	(90)
复习题	(96)
第四章 指令与指令系统	(99)
§4-1 指令与指令格式	(99)
§4-2 指令的类型	(101)
§4-3 寻址方式	(104)
§4-4 DJS130机指令系统	(110)
§4-5 指令应用举例	(129)
复习题	(131)
第五章 运算器.....	(134)

§5-1 定点补码加减法运算及操作过程	(135)
§5-2 浮点机的加减法运算	(140)
§5-3 乘法运算	(144)
§5-4 除法运算	(154)
§5-5 加法器的组成	(160)
§5-6 运算器的其他部件	(166)
复习题	(174)
第六章 控制器	(176)
§6-1 控制器的一般介绍	(178)
§6-2 时序系统	(179)
§6-3 指令部件	(190)
§6-4 母线结构	(194)
§6-5 操作控制部件一般介绍	(196)
§6-6 典型指令执行过程	(212)
§6-7 控制台	(212)
复习题	(219)
第七章 微程序控制技术	(221)
§7-1 微程序控制的概念	(221)
§7-2 微程序控制器的组成及微指令格式	(221)
§7-3 微程序控制器的基本原理	(226)
§7-4 改进模型机	(235)
复习题	(242)
第八章 存储器	(244)
§8-1 存储器的一般介绍	(244)
§8-2 磁心存储信息的原理	(246)
§8-3 磁心体的读写方法(一)——电流重合法	(250)
§8-4 磁心体的读写方法(二)——线选法和二度半法	(259)
§8-5 地址单元选择线路	(266)
§8-6 驱动线路	(269)
§8-7 读出放大器	(273)
§8-8 写入电路	(277)
§8-9 存储器的技术指标	(279)
§8-10 内存贮器举例	(280)
§8-11 奇偶校验和下雨检查	(284)
§8-12 半导体存储器	(286)
复习题	(295)
第九章 中断与通道	(297)
§9-1 中断的概念	(297)
§9-2 中断处理要素	(298)

§9-3 外设接口	(302)
§9-4 中断系统一例	(307)
§9-5 数据通道	(313)
§9-6 DJS130机的数据通道	(318)
复习题	(325)
第十章 外部设备	(326)
§10-1 外部设备概述	(326)
§10-2 光电输入机	(327)
§10-3 快速输出纸带穿孔机	(332)
§10-4 控制台打字机	(337)
§10-5 宽行打印机	(349)
§10-6 磁盘存储器	(359)
复习题	(378)
第十一章 计算机的生产与调试	(380)
§11-1 计算机的生产	(380)
§11-2 计算机的分机调试	(385)
§11-3 计算机的联调	(391)

绪 论

一、电子数字计算机的发展和应用

电子计算机是一种能自动地进行高速运算、信息处理和检测控制的电子装置。平常所说的电子计算机，一般是指数字式电子计算机，亦称电子数字计算机。它的特点是以数字形式的量值在机器内部进行操作运算；整个工作过程按人们安排好的步骤自动进行，不需要人直接参与计算过程；计算速度快而且精度高，并具有很强的“记忆”能力和逻辑判断能力，因而它能模拟人的大脑的一些功能。电子数字计算机功能多，适应性好，应用广泛，远远超过其他各种机械式及电子式的机器。

1. 电子计算机的发展

计算工具的发展经历了漫长的过程。在原始时代，人类生活简单，生产力低下，无需进行计算。随着社会的进步，文化的发展，数值计算问题才逐步提到日程上来。不过早期的计算量小，方法也简单，用纸和笔作工具，依靠人脑和手就能进行。后来由于生产技术的不断提高，计算工作量日趋繁重，为了适应需要，人们便创造了各种计算工具。我国古代就有种种记数和计算器械，为其他各国所未见。公元前二、三世纪，算筹的运用已达到相当纯熟的地步；唐朝中叶以后就创造了算盘，而且以其构造简单、价格低廉、计算迅速等优点，受到人们的欢迎，至今盛行不衰。十七世纪以后，欧洲又相继出现了计算尺、手摇计算机和电动计算机等。对一般的计算问题，这些工具足可应付。随着近代大工业生产技术、现代尖端科学技术（如原子物理、宇宙航行、飞机制造、导弹发射等）的发展，特别是第二次世界大战中迅速发展起来的军事技术，提出了大量复杂的计算问题，而且要求快速、精确地算出结果。这样一来，当时的计算工具便远远不能满足需要。到了二十世纪四十年代，由于电子器件、脉冲技术、自动控制技术的发展，为计算工具的进一步改革提供了条件。于是，在一九四六年，世界上第一台电子数字计算机在美国问世了。这台机器命名为“电子数值积分器和计数器”，简称 ENIAC，它是为解决复杂的弹道计算而研制的。

ENIAC使用了18000多只电子管，重30吨，体积为90立方米，占地170平方米，耗电量150千瓦，加法运算速度每秒5000次。现在看来，ENIAC显然水平不高，但是，由于它采用了电子器件，用电信号代表数码，用电信号控制运算，克服了机械惯性，使其运算速度有了惊人的提高，显示了电子计算机的巨大威力，给电子计算机的发展展现了广阔的前景。所以人们普遍认为，电子计算机的出现，是二十世纪科学技术的卓越成就之一，有力地推动了生产、科学技术及文化事业的发展。

三十多年来，计算机技术的发展极为迅速。就计算速度而言，已由5000次/秒发展到几亿次/秒。一九七三年美国伊利诺斯大学研制成功的ILLIACIV巨型机，速度达一亿五千万次/秒。计算速度的提高在很大程度上是靠器件的改进来实现的。纵观计算机的发展历史，就器件而论，已经历了如下所述的四代更新。

第一代是电子管计算机，大致经历了十年，当时主要应用于科学计算。

一九五八年，开始用晶体管取代电子管，使电子计算机进入了第二代。这代机器，体积

大为缩小，耗电量大幅度下降，稳定可靠性大大提高，速度可达每秒几十万次。应用范围推广到数据处理，并开始用于过程控制。

采用集成电路的计算机被称为第三代计算机，是从一九六四年IBM360系列问世开始的。在发展大型机的同时，小型、超小型机也飞速发展起来。机种多样化，系列化，广泛应用于科学计算、数据处理和工业控制各个领域。

计算机的第四代是指全面采用大规模集成电路的时代。第四代计算机在软件与硬件方面将有更多的结合，在应用方面则出现了多机结合，形成综合信息处理网络，进入了以网络为特征的时代。

人们预见，研究具有摹仿人的思维和学习能力的智能机将是今后发展的方向。

自从进入六十年代以来，计算机明显地呈现出向两极发展的趋势：大型、巨型机的发展突飞猛进，小型、微型机也如同雨后春笋，迅速发展起来。

大型、巨型机以容量大，速度高及系统复杂庞大为其特点，适用于军事部门、计算中心及尖端技术领域中。

小型机最早出现于六十年代中期（从美国生产的PDP-8系列开始），一般性能可满足工业控制和数据处理的需要。小型机也逐渐呈现出向高档和低档两极分化：低档机趋于微型化，向微型机靠拢；高档机则向多功能、复杂化发展，逐步采用大型机的一些先进技术。目前，国际上小型机占有相当的地位。

微型机是一九七一年出现的，它是大规模集成电路的产物。它比小型机小得多，结构与传统的计算机相似。优越之处是：它的中央处理机（也称微处理器或微处理机）是由一片或几片大规模集成电路所组成的。微处理机加上其它部件，如脉冲发生器、存贮器及设备接口电路等便构成微型计算机。微型机目前国外已有几百个品种，产品已系列化，其功能已达到或接近于小型机的水平，是很有前途的机种之一。

计算机事业在我国还属新兴事业，仅有二十多年的历史。一九五八年，我国研制成功第一台电子管计算机，一九六四年又研制成晶体管计算机，速度7万次/秒。一九七〇年以后制造了第三代计算机，七十年代末又研制成微型计算机。目前我国大、中、小及微型机都已批量生产。小型机产量最多，功能较强，性能也比较稳定可靠。为适应我国国民经济发展的需要，我们还要大力发展计算机事业，提高研制水平，扩大生产能力，尤其要加强应用方面的研究，以便推广和普及。

2. 电子计算机的应用

电子计算机经三十多年的发展，功能不断增强，应用范围越来越广，已深入到国民经济的各个领域。

（1）科学计算 在现代科学技术中，有大量繁杂的数值计算问题，必须靠计算机帮助解决。如以往的化学是一门经验科学，研究材料、药物等许多工作都凭经验摸索。随着量子化学的推广和应用，人们能根据理论计算去“设计”新材料，新药物，这叫“分子设计”。对于一个含25个碳、14个氢，4个氮、7个氧的分子进行量子化学计算，就要一百亿个积分计算，这类新奇的化学实验不能用化学试剂，而要用微观结构参数，不使用计算机是无法进行的。

近年来，计算机应用于数学，解决数学难题，突出的例子是“四色问题”。人们知道，绘制地图要用不同的颜色区分国家。早在十九世纪四十年代和五十年代，德国、英国都有人

提出：为什么绘制任何一张地图，至少用四种颜色就够了呢？这就是被后人视为著名的“四色问题”。一百多年来，许多学者花费了巨大精力去证明它都没有成功。直到1976年，美国伊利诺斯大学的阿沛尔和黑肯用高速计算机作了二百亿个逻辑判断，证明了上千个引理，花了1200个小时才攻克了它。这一成果使很多人大为震惊。它的意义不仅在于解决“四色问题”本身，更重要的是使人们看到理论问题的证明可以机械化；它可将数学家从冗长繁琐的证明中解放出来，去从事更富有创造性的劳动；开辟了人和机器合作解决理论问题的途径。

计算机参与气象预报工作是较早的应用项目之一。天气预报是个时间性很强的工作，用计算机能算得准确，报得及时。

(2) 数据处理 会计、统计、试验数据的整理工作，数据量庞大，计算却很简单。整理出的数据，常常要列出表格或绘出图形，作为文件存贮或分析的依据，这类性质的工作就叫数据处理。计算机应用数据处理，在世界上占最大的比重。

计算机用于企业管理是数据处理的典型之一。现代化企业的资源之一是信息。计算机能把企业生产活动中的各种信息，如资金、人力、物力、生产、销售和库存等信息进行收集、存贮和处理，并能进行生产调度，安排生产计划，从而可缩短生产周期，加速资金周转，提高生产效率和经济效益。计算机用于地质勘探，也是进行数据处理。

(3) 工业控制与尖端科学 计算机应用于工业控制较为普遍。计算机可以控制一台或数台机床，也可控制一个生产工段或整个工厂。计算机能分配机床之间的零件加工工序，选择合理的加工规范；同时，计算机还能承担设计、计算等工作，可建立综合自动化系统。

在尖端科学技术方面，计算机的地位显得尤为重要，其高速工作的特点在这里得到了充分的发挥。人造地球卫星及洲际导弹的飞行速度极快，要想掌握它们的飞行情况，只有用计算机及时算出它们的运行轨迹，以便跟踪，才能做到。在现代国防上，没有速度是谈不上自卫的。

1981年美国哥伦比亚号航天飞机的飞行成功，就是通过一个航天史上最大的机上和地面计算机群进行控制的。

除以上介绍的几个主要方面外，计算机还用于数据通讯、辅助设计，辅助教学及医学上的临床诊断。

当代计算机用于医疗诊断方面的辉煌成就是CT技术。普通的X射线能有效地透视骨骼情况，但拍摄内脏器官的照片就模糊不清。采用CT扫描机进行检查，是通过X射线光束对人体某一截面从不同角度多次扫描，由计算机接收、存贮某截面上的投影讯号，并作快速准确地计算处理，使人体各部位的横断面在几秒钟内就展现在电视荧光屏上，一目了然。同时还避免了外科检查给病人带来的痛苦和伤害。CT技术是继X射线之后，医学物理上的最大发明。*

二、计算机的组成及工作过程概述

电子计算机系统可分两大部分：一为机器系统，就是通常人们所说的硬件或称硬设备，是构成计算机的元器件、部件和设备等；二为程序系统，就是人们常说的软件或称软设备，是管理机器和使用机器的智能部分，其中包括系统软件、应用软件、程序设计语言等。两者间的关系，可打个通俗的比方，硬件相当于钢琴，软件相当于乐谱，有谱无琴发不出声音，

* 发明者是英国电子工程师霍斯菲尔德和美国理论物理学家科马克，荣获1979年诺贝尔生理医学奖。

有琴无谱也弹不出优美动听的曲调。两者相辅相成，结合为一体，方可活跃在人类社会的各个领域，展示才能，成为人类实践活动的得力助手。

1.计算机的硬件组成

一台计算机主要由运算器、存贮器、控制器和外部设备四大部件组成。见图0-1。

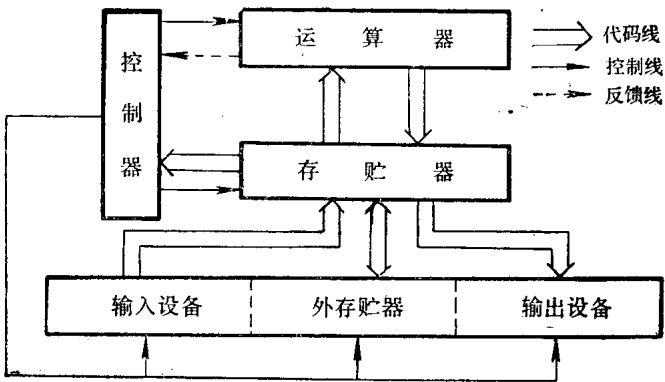


图0-1 计算机框图

(1) 运算器 是运算部件，类似于算盘。它能进行加、减、乘、除四则运算，也能对数据进行比较、移位等逻辑运算。运算过程中受控制器统一指挥，不断得到存贮器提供的数据，并将运算结果送回存贮器保存。

(2) 存贮器 是记忆部件。它相当于人的大脑，能记忆信息。当使用时，可根据需要把记忆的内容取出来（但不破坏原记忆的内容）；不需要的内容还可抹去，再记忆新的内容。存贮器中存有数据和程序。它将不断地向控制器输送指令以供分析，决定机器作什么操作。同时在控制器控制下将所需数据送往运算器参加运算，并接收运算器送来的运算结果，加以存贮。

(3) 控制器 是全机的指挥机关，相当于人的中枢神经系统。计算机的工作就是执行程序，控制器就是通过程序控制全机协调工作的。

以上介绍的运算器、存贮器、控制器三者的组合体称为主机；主机中的运算器和控制器称为中央处理机（英文缩写CPU）。

(4) 外部设备 包括输入、输出设备和外存贮器。

输入设备的任务是将程序和数据输入至内存贮器中；输出设备的任务是把运算结果记录或显示出来。

外存贮器是为扩大计算机存贮容量而设置的。目前主要有磁带、磁鼓和磁盘，其特点是存贮容量大。它可与内存贮器成批地交换信息。

除了以上介绍的四大部分以外，一般计算机还设有控制台，小机器则设控制面板，功能基本相似，它是通过人工操作来控制机器的装置。

2.计算机的工作过程

用计算机算题，大体可分两步：

第一，上机前的准备工作——编制程序。在解题之前，人们要根据题目内容规划算法，将此算法分解成机器所能执行的基本操作，再按机器所能识别的一定格式编制好整个计算步

骤，通常叫编制程序。

第二，输入程序，启动机器执行程序。这一步骤是将编制好的程序和原始数据通过输入设备送入内存贮器中，然后启动机器工作，计算机就按编排好的程序步骤一步步地执行程序，直到算出结果，通过输出设备将结果输出。

下面通过具体例题，来进一步说明计算机的工作过程。

例 计算 $(a+bc) \div d$ (a, b, c, d 代表数据)

人工计算这个题目，首先是通过眼睛把题目输入给大脑，大脑依据算法规则知道：先算括号内，后算括号外；括号内先算乘，后算加；最后算除。于是计算步骤为：计算 bc ，计算 $a+bc$ ，计算 $(a+bc) \div d$ 。

那么计算机如何计算呢？可以说，与人的计算过程大体相同，只是把大脑的计算步骤转化成机器所能识别的程序。上述计算步骤可归纳为：取数（取 b ）；乘法 $b \times c$ ；加法 $a+bc$ ；除法 $(a+bc) \div d$ ；存贮结果；将结果 $(a+bc) \div d$ 打印输出。这就是计算机进行计算的计算程序。其中每一步骤叫做一条指令。如取数指令、乘法指令、加法指令、存贮、打印指令等等。下面给出计算机的工作过程（参照图0-1）。

首先，在计算机的控制器控制下，将原始数据 a, b, c, d 及上述计算程序通过输入设备输入到内存贮器（以下简称内存）保存起来。

然后，按照程序安排，启动机器执行程序：

（1）控制器首先将“取数（取 b ）指令”由内存取到控制器，在“取数指令”作用下，将数据 b 取到运算器来。

（2）控制器将“乘法指令”由内存取到控制器，在该指令作用下将数据 c 取到运算器，并在运算器中实现乘法运算（计算 bc ），且保存结果。

（3）控制器再将“加法指令”由内存取到控制器，在该指令作用下将 a 取到运算器，并实现 $a+bc$ 的加法运算且保存结果。

（4）控制器将“除法指令”由内存取到控制器，在该指令作用下，将 d 取到运算器作除法运算，计算 $(a+bc) \div d$ ，并保存结果。

（5）控制器再将“存数指令”由内存取到控制器，在存数指令作用下，将运算结果 $(a+bc) \div d$ 存入内存中。

（6）最后，控制器将“输出指令”由内存取到控制器，在此指令作用下将运算结果打印输出。运算到此结束。

至于计算机具体怎样输入，怎样运算，怎样输出，即各部件是怎样具体工作的，控制器又如何实现对各部件的控制，将在后面各章节中详细讲述。

第一章 运算基础

电子计算机的主要功能是对数码信息进行数学运算或者进行加工处理,它的一切活动都在和数码信息打交道。那么,数在机器中如何表示,数的符号如何处理,小数点的位置如何安置,这些都是在了解计算机如何运算之前应首先搞清的问题。

§1-1 计算机中的数制

数制,也称进位制,是用来描述事物数量的一种符号系统。目前采用较多的有以下几种。

一、十进计数制

人们在长期的生活实践中学会了用十个指头计数,所以最早产生了十进制,至今还被普遍采用着。

十进计数制采用十个不同的数码符号,即 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9;逢十进一。

根据十进制的特点,对一个十进制数,如 3257.46,可以写成如下的多项式形式

$$3257.46 = 3 \times 10^3 + 2 \times 10^2 + 5 \times 10^1 + 7 \times 10^0 + 4 \times 10^{-1} + 6 \times 10^{-2}$$

一般地,对任一个十进制数 A ,若

$$A = a_n a_{n-1} \cdots a_1 a_0 . a_{-1} \cdots a_{-m}$$

则可以写成

$$\begin{aligned} A &= a_n (10)^n + a_{n-1} (10)^{n-1} + \cdots + a_1 (10)^1 + a_0 (10)^0 + a_{-1} (10)^{-1} + \cdots + a_{-m} (10)^{-m} \\ &= \sum_{i=-m}^n a_i (10)^i \end{aligned} \quad (1-1)$$

其中 m 和 n 为正整数, a_i 为 0, 1, 2, ..., 9 十个数码中的一个,具体等于什么,由具体数决定。

(1-1)式括号中的“10”,称为十进制的基数,而 $(10)^i$,叫数位的权;(1-1)式,就叫数 A 的按权展开式。

所谓基数,实质表明该计数制所用的数码符号的个数;而 $(10)^i$ 称为数位的权,因为它能够权衡数位 a_i 的实质大小。

除了十进计数制以外,人们还采用着其他多种进位制。如计时,是六十进位;老秤十六两一斤,是十六进制,等等。

从电子计算机的研制实践中发现,十进制并不是最合适的计数系统,而二进制却有其独到之处。所以,目前电子计算机中均采用二进制计数系统。

二、二进制数制

二进制数制是一种最简单的计数系统。它只采用“0”和“1”两个数码符号,而是逢二进一。就是说,任何一个二进制数的每一位只能取“0”或取“1”,满“2”就向相邻

高位进一。换句话说，二进制数的每一位数都是它相邻低位的二倍，或者说，是它相邻高位的二分之一（当然都是指有效数字）。

如二进制数 $(N)_{\ominus} = 10111.101$ ，它的每一位所表示的实际数值，看下列对应表：

1	0	1	1	1	.	1	0	1
↓	↓	↓	↓	↓		↓	↓	↓
16	0	4	2	1		$\frac{1}{2}$	0	$\frac{1}{8}$
或						2^{-1}	(2^{-2})	2^{-3}
	2^4	(2^3)	2^2	2^1	2^0			

或

于是可得

$$10111.101 = 1 \times 2^4 + 0 \times 2^3 + 1 \times 2^2 + 1 \times 2^1 + 1 \times 2^0 + 1 \times 2^{-1} + 0 \times 2^{-2} + 1 \times 2^{-3}$$

一般地，任给一个二进制数 $(B)_{\ominus}$ ，若

$$(B)_{\ominus} = b_n b_{n-1} \cdots b_1 b_0 . b_{-1} \cdots b_{-m}$$

则

$$(B)_{\ominus} = b_n (2)^n + b_{n-1} (2)^{n-1} + \cdots + b_1 (2)^1 + b_0 (2)^0 + b_{-1} (2)^{-1} + \cdots + b_{-m} (2)^{-m}$$

$$= \sum_{i=-m}^n b_i (2)^i \quad (1-2)$$

其中 m 和 n 均为正整数， $b_i = 0, 1$ ， $(i = -m, -m+1, \cdots, n)$

(1-2)式括号中的“2”，称为二进制的基数，而 $(2)^i$ 叫数位的权；(1-2)式就叫做二进制数 $(B)_{\ominus}$ 的按权展开式。

可以看出，如将(1-2)式中的“2”，用二进制“10”代替，则(1-2)式和(1-1)式就完全一样了。

二进制计数制是比较简单的，但初接触起来并不习惯。为了熟悉二进制数，下面给出部分十进制数的二进制表示：

$0 = (0)_{\ominus}$	$1 = (1)_{\ominus}$	$2 = (10)_{\ominus}$	$3 = (11)_{\ominus}$
$4 = (100)_{\ominus}$	$5 = (101)_{\ominus}$	$6 = (110)_{\ominus}$	$7 = (111)_{\ominus}$
$8 = (1000)_{\ominus}$	$9 = (1001)_{\ominus}$	$10 = (1010)_{\ominus}$	$11 = (1011)_{\ominus}$
$12 = (1100)_{\ominus}$	$13 = (1101)_{\ominus}$	$14 = (1110)_{\ominus}$	$15 = (1111)_{\ominus}$

部分十进制小数的二进制表示：

$$\begin{aligned} 0.5 &= (0.1)_{\ominus} & 0.25 &= (0.01)_{\ominus} & 0.125 &= (0.001)_{\ominus} \\ 0.0625 &= (0.0001)_{\ominus} & 0.75 &= (0.11)_{\ominus} & 0.375 &= (0.011)_{\ominus} \end{aligned}$$

如果一个二进制数 $(N)_{\ominus} = 11011.011$ 转换成十进制数是多少呢？

依照二进制数的定义，由(1-2)式可知

$$\begin{aligned} N &= (11011.011)_{\ominus} \\ &= 1 \times 2^4 + 1 \times 2^3 + 1 \times 2^2 + 1 \times 2^1 + 1 \times 2^0 + 1 \times 2^{-2} + 1 \times 2^{-3} \\ &= 16 + 8 + 4 + 2 + 1 + 0.25 + 0.125 \\ &= 27.375 \end{aligned}$$

这就是说，二进制数中的11011.011是十进制数中的27.375。

三、二进制数的特点

目前大多数计算机为什么都采用二进制呢？计算机究竟采用哪种进位制，取决于这种进

⊖ 右下角的标号表示进制制；如不加标注，则为十进制数。

位制在机器的设计制造上是否容易实现，是否计算简便、稳定可靠，是否节省器材。二进制在这几方面确有许多胜于其他进位制的独到之处。

首先，二进制只用“0”和“1”两个数码，凡是具有两个稳定的物理状态的元器件，都可用来表示数的一位。所以，在机器中采用器件表示数码非常容易。事实上，存在着许多种元器件具有两种稳定的物理状态，如继电器的吸合与释放，氖灯泡的亮与灭；晶体管的导通与截止；铁淦氧磁心的两种不同的剩磁状态；脉冲信号的有和无；电位信号的高与低等等，这些都在机器的不同部位上被采用着。它们所具有的两种稳定的物理状态，截然不同，彼此对立，分别用来表示“1”和“0”两个数码，状态差别明显，这一点对机器的工作性能关系极大。计算机运算所以不易出错，准确度高，工作可靠，采用二进制，采用双稳态器件表示数码是一个重要原因。

其次，二进制数运算简便。

如

一位数加法	一位数乘法
$0 + 0 = 0$	$0 \times 0 = 0$
$0 + 1 = 1$	$0 \times 1 = 0$
$1 + 0 = 1$	$1 \times 0 = 0$
$1 + 1 = 10$	$1 \times 1 = 1$

多位数的加、减、乘、除运算也很简单、方便。

例 1

$$\begin{array}{r} 1011 \\ + 1001 \\ \hline 10100 \end{array} \quad \begin{array}{l} (11) \\ (+9) \\ (20) \end{array}$$

例 2

$$\begin{array}{r} 1001 \\ - 0101 \\ \hline 100 \end{array} \quad \begin{array}{l} (9) \\ (-5) \\ (4) \end{array}$$

例 3

$$\begin{array}{r} 1011 \\ \times 1010 \\ \hline 0000 \\ 1011 \\ 0000 \\ 1011 \\ \hline 1101110 \end{array} \quad \begin{array}{l} (11) \\ (\times 10) \\ (110) \end{array}$$

例 4

$$\begin{array}{r} 1101 \quad (13 \text{ 商数}) \\ 1011 \overline{) 10010011} \quad (147 \text{ 被除数}) \\ \underline{1011} \\ 1110 \\ \underline{1011} \\ 1111 \\ \underline{1011} \\ 100 \quad (4 \text{ 余数}) \end{array}$$

运算简便，机器就实现容易，机器结构也就简单，这就为提高机器的速度及可靠性提供了有利条件。

再者，在二进制中，“只用0”和“1”两个数码符号，可以应用逻辑代数理论分析、综合逻辑线路，为机器的设计提供了方便的条件。（详细内容将在第二、三章介绍）

四、八进制与十六进制

采用二进制固然有它一些独特的优点，但也存在着一些不足之处。二进制基数小，进位快，数位长，不宜读写，不易辨认，在使用中又不那么习惯和方便。为了弥补这一缺点，在某些场合也常采用八进制和十六进制。

1. 八进制

八进制采用0，1，2，3，4，5，6，7八个数码符号；逢八进一。

假设有一数 N ，它的八进制表示为 $(N)_8$ ，且

$$(N)_8 = l_n l_{n-1} \cdots l_1 l_0 . l_{-1} \cdots l_{-m} \quad (l_i = 0, 1, 2, \cdots 7)$$

它的按权展开式为：

$$\begin{aligned} N &= l_n \times 8^n + l_{n-1} \times 8^{n-1} + \cdots + l_1 \times 8 + l_0 + l_{-1} \times 8^{-1} + \cdots + l_{-m} \times 8^{-m} \\ &= \sum_{i=-m}^n l_i \times 8^i \end{aligned} \quad (1-3)$$

例如，有一八进制数 $(N)_8 = 235.04$ ，它是十进制数的多少呢？

根据八进制数的特点，将 $(N)_8$ 按权展开便得

$$(N)_8 = 2 \times 8^2 + 3 \times 8 + 5 + 4 \times 8^{-2} = 157.0625$$

$$\therefore (235.04)_8 = 157.0625$$

显然，采用八进制在书写方面和十进制差不多，但与二进制比较，数位就缩短多了。因此在使用过程中，常用来书写数据和指令。

2. 十六进制

十六进制采用十六个数码符号，除了用十进制的0，1，2，…，9这十个数码以外，一般采用英文前六个字母A，B，C，D，E，F作为数码符号之用。A，B，C，D，E，F依次代表十六进制数中的10，11，12，13，14，15。

在加减运算中是逢十六进一，借一当十六。欲将十六进制数化成十进制数，同样只需按权展开即可。

例如，将十六进制数 $3A.8$ 化成十进制数，将其按权展开得

$$(3A.8)_{16} = 3 \times 16 + 10 + 8 \times \frac{1}{16} = 58.5$$

$$\therefore (3A.8)_{16} = 58.5$$

十六进制与八进制在使用中大致相同。一般在字长较长的大机器中，读写数据和指令多采用十六进制；在字长较短的小机器中，多采用八进制。八进制和十六进制的使用仅体现在机外数据的读写方面，而在机器内部采用的仍是二进制数。

通过以上四种进位制的讨论可以发现，各种进位制都有一个固定的基数 R ，采用 R 个不同的数码符号；逢 R 进一，都能按权展开。若 R 进制的数 $(K)_R$ ，且 $(K)_R = k_n k_{n-1} \cdots k_1 k_0 . k_{-1} \cdots k_{-m}$ ，其展开式为

$$(K)_R = \sum_{i=-m}^n k_i \cdot R^i$$

当 $R = 2$ ，便是二进制； $R = 8$ ，便是八进制； $R = 16$ ，便是十六进制，等等。